

Krawczyk, C. (2021): Wie Glasfaserkabel als Geosensoren zur Erkundung und Überwachung des Untergrunds genutzt werden können – Anwendung und Potenzial von ortsverteilten akustischen Dehnungsmessungen = How fibre optic cables can be used as geosensors to explore and monitor the subsurface – application and potential of distributed acoustic sensing. - Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, 28, 1/2, 15-28.

Brandenburg. Geowiss. Beitr.	Cottbus	28 (2021), 1/2	S. 15–28	10 Abb., 61 Zit.
------------------------------	---------	----------------	----------	------------------

Wie Glasfaserkabel als Geosensoren zur Erkundung und Überwachung des Untergrunds genutzt werden können – Anwendung und Potenzial von ortsverteilten akustischen Dehnungsmessungen

How fibre optic cables can be used as geosensors to explore and monitor the subsurface – application and potential of distributed acoustic sensing

CHARLOTTE KRAWCZYK

1 Einleitung

Faseroptische Technologien werden in immer mehr Forschungsbereichen der Naturwissenschaften und ingenieurwissenschaftlichen Anwendungen eingesetzt, und zwar nicht nur zur Datenübertragung, sondern auch zur Sensorik. Die verteilte faseroptische Abtastung hat im letzten Jahrzehnt viel Aufmerksamkeit erlangt (MASOUDI & NEWSON 2016, MARTIN et al. 2017, REINSCH et al. 2021, CARLIDGE 2021). Die physikalischen Eigenschaften von Lichtwellenleitern erlauben es, bei geeigneter Konstruktion und Abfrage mit einer geeigneten Lichtquelle, auch unter schwierigen Bedingungen auf die Veränderung von Umweltparametern zu reagieren, z. B. auf Temperatur, Dehnung oder chemische Konzentration (FREIFELD et al. 2008, DALEY et al. 2013, BECKER et al. 2017, HARTOG et al. 2018).

Verteilte faseroptische Sensoren ermöglichen eine kontinuierliche Messung von Umweltparametern mit hoher räumlicher Auflösung entlang der Messfaser (Meterskala) und mit hoher zeitlicher Abtastrate ($> \text{kHz}$) über große Entfernungen (mehrere km) (Abb. 1). Das physikalische Messprinzip beruht je nach Abfragetechnik auf verschiedenen Streuphänomenen des Lichts innerhalb der Faser (z. B. Brillouin, Rayleigh, Raman). So können durch Abfrage der Lichteigenschaften (z. B. Intensität, Phase, Laufzeit, Polarisation) charakteristische Eigenschaften gemessen werden (WU et al. 2015, ZHOU et al. 2015, LIEHR et al. 2020).

Zu den Anwendungen gehören Integritätsüberwachung von Materialien (NÖTHER et al. 2008, PEARCE et al. 2009, REINSCH et al. 2012, 2017, HUSSELS et al. 2019, BÜCKER & GROSSWIG 2017, KINDLER & GROSSWIG 2018, LIPUS et al. 2021b), Perimetersicherheit (MAHMOUD et al. 2012), Überwachung von Telekommunikations- und Bahnnetzen (PENG et al. 2014, MARTIN et al. 2017), aber auch geophysikalische Anwendungen in der Industrie und Untergrundspeicherung. Die Geosensorik mit Glasfasern umfasst beispielsweise vertikale seismische Profile in Bohrungen (MESTAYER et al. 2011, MILLER et al. 2012, MATEEVA et al. 2014, HENNINGES et al. 2021, MARTUGANOVA et al. 2021), Überwachung der

Mikroseismizität während hydraulischer Stimulationen (KARRENBACH et al. 2017, MOLteni et al. 2017, LELLOUCH et al. 2020), Überwachung des Flüssigkeitsstroms durch Produktion im Bohrloch (z. B. EARLES et al. 2011, LIPUS et al. 2021a), Erkennung von Erdbeben (LINDSEY et al. 2017, WANG et al. 2019, MARRA et al. 2019, CURRENTI et al. 2021) und die Erforschung der Struktur der Erdkruste (DOU et al. 2017, JOUSSET et al. 2018, AJO-FRANKLIN et al. 2019, KRAWCZYK et al. 2019, 2021) und ihrer Oberflächenbewegung (MICHLMAYR et al. 2016, SCHENATO et al. 2017).

In diesem Beitrag wird zunächst das generelle Prinzip kurz erläutert, um danach auf ortsverteilte Dehnungsmessungen zu fokussieren, deren Potenzial an vorhandenen Beispielen und mit einem Ausblick auf Brandenburg und städtische Bereiche erläutert wird.

2 Funktionsweise von faseroptischen Messungen

2.1 Physikalisches Grundprinzip

Für ortsverteilte akustische Dehnungsmessungen (Distributed Acoustic Sensing, DAS) wird typischerweise die phasensensitive, optische Zeitbereichsreflektometrie (ϕ -OTDR) eingesetzt (vgl. WU et al. 2015, MASOUDI & NEWSON 2016). Eine spezielle Messeinheit injiziert ultrahochfrequente Laserimpulse in die Glasfaser (Abb. 2). Während diese den optischen Pfad hinunterwandern, kommt es zu Wechselwirkungen innerhalb der Faser, die zu Lichtreflexionen, der sogenannten Rückstreuung, führen. Das reflektierte Licht wandert die Faser wieder hinauf zum Messgerät, wo die zurückgestreuten Signale als Messwerte aufgezeichnet werden. Durch die Zeitsynchronisation des Laserpulses kann das Rückstreuereignis (Rayleigh-Streuung) genau einer Faserdistanz zugeordnet werden. Sobald der Lichtimpuls das Ende der Faser erreicht hat und alle Reflexionen zum Abfragegerät zurückgelaufen sind, kann der nächste Laserimpuls, ohne das Risiko von Interferenzen, eingeleitet werden. Für jeden Laserpuls wird so die gesamte Faserlänge an jedem Punkt der Faser abgetastet.

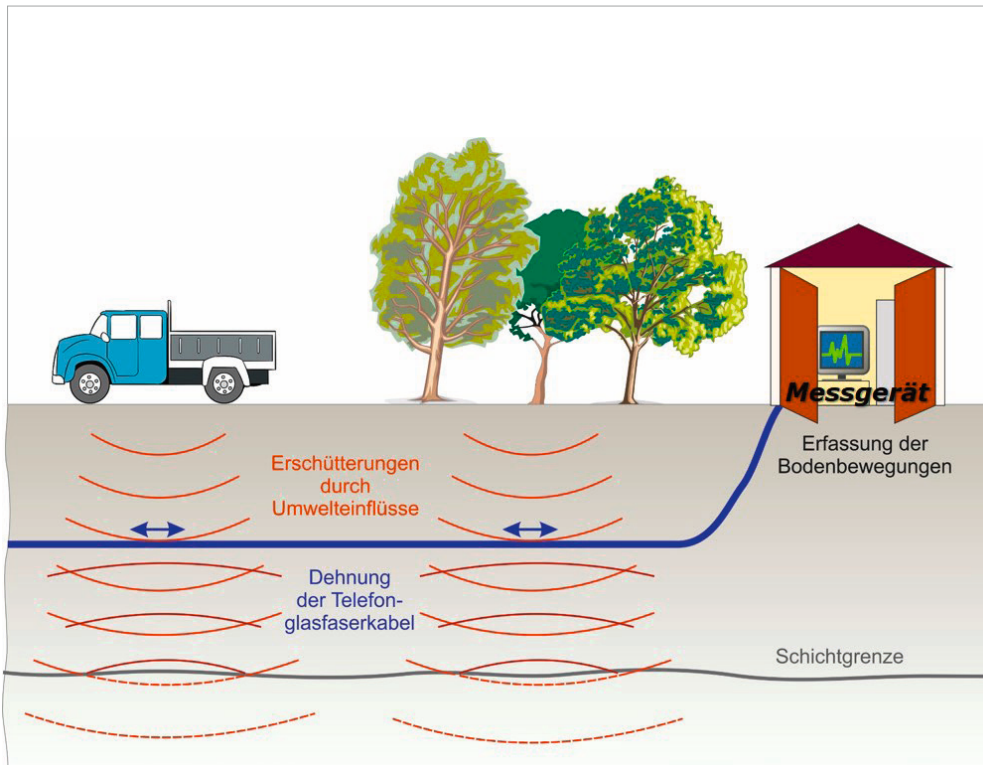


Abb. 1:
Aufzeichnung des seismischen Wellenfelds und der Deformation des Untergrundes mittels ortsverteilter faseroptischer Dehnungsmessungen (Distributed Acoustic Sensing, DAS) zur Exploration von geologischen Strukturen sowie zur Überwachung des Untergrundes (z. B. Änderung physikalischer Gesteinseigenschaften oder Fließbewegungen; GEOPUR 2021).

Fig. 1:
Recording of the seismic wave field and subsurface deformation using Distributed Acoustic Sensing (DAS) for exploration of geological structures and monitoring of the subsurface (e. g., changes in physical rock properties or flow movements; GEOPUR 2021).

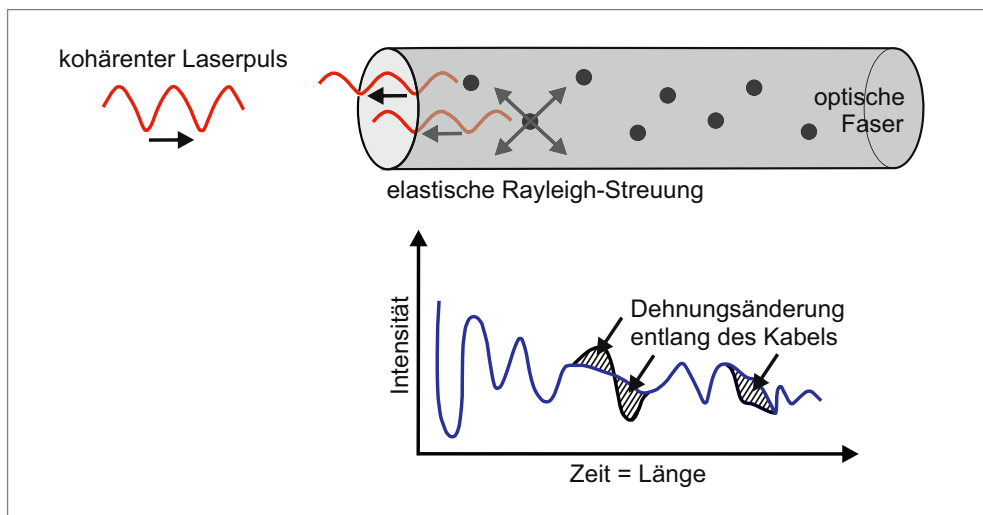


Abb. 2:
Prinzip der ortsverteilt akustischen Dehnungsmessung (Distributed Acoustic Sensing, DAS) (nach KRAWCZYK et al. 2019).

Fig. 2:
Principle of Distributed Acoustic Sensing (DAS) along a fibre optic cable (after KRAWCZYK et al. 2019).

Das Ergebnis ist eine kontinuierliche akustische Abtastung entlang der gesamten Länge der optischen Faser mit einem Frequenzbereich von Millihertz (mHz) bis über 50 Kilohertz (kHz) und einem Dynamikbereich von über 120 dB. Die Änderung des lokalen interferometrischen Musters gibt schließlich Aufschluss über die an einer bestimmten Stelle aufgenommene zeitlich variable Dehnung, wobei angenommen wird, dass der Phasengang linear zur induzierten Dehnung ist (Abb. 2).

Die feinste Dehnung einer Glasfaser kann zum einen mit seismischen Quellen aktiv vor Ort und kontrolliert angeregt werden. Zum anderen kann man passiv eine Vielzahl von Signalen messen, die z. B. sowohl durch die Nutzung des Untergrundes als Speicher oder bei der Rohstoffförderung

als auch durch Erschütterung bei industriellen-/Bau-Maßnahmen oder den Verkehr entstehen. Nicht zuletzt liefern die unterschiedlichen geologischen Prozesse Signale, deren Auswertung auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen den Zustand und die Veränderungen des Geosystems erfassen und vorhersagen helfen.

Parameter, die für ein Experiment gewählt werden müssen, umfassen die Messlänge (Länge des Intervalls entlang des Kabels, für die die Phasendifferenz gemessen wird; normalerweise zwischen 2–10 m) und die Bandbreite des DAS-Signals (im Bereich von mHz bis kHz). Die dann gemessene physikalische Größe ist die Veränderung der Deformation des Kabels mit der Zeit (*strain rate*). Integriert man diesen Messwert über die Zeit, er-

gibt sich daraus die lokale Verformung (*strain*). Je nach Ausrichtung des Untersuchungsobjektes und gewünschtem Detailgrad, kann man ein Kabel sowohl vertikal im Bohrloch verwenden oder nach Abteufen einer Bohrung hinter der Verrohrung einbringen als auch neue oder vorhandene Telekommunikationskabel, die horizontal im Untergrund verlaufen, nutzen. Insbesondere ist die flächige Abtastung im Aufwand den bisher verwendeten Seismometer- und Geophon-Auslagen überlegen, wenn ein dichtes Messraster aufgenommen werden soll (siehe Beispiel in Kap. 3.1).

Aufgrund dieser hohen Frequenzen und Abtastraten entstehen neue Anforderungen an die Datenübertragung und das Datenhandling, da Datensätze mit sehr großem Volumen erzeugt werden. Misst man zum Beispiel mit einem 10 km langen Kabel, unter Abtastung alle 4 m und mit 1 kHz Akquisitionsrate, so ergeben sich für 3700 gemessene Spuren etwa 1 GB/Minute an Daten, also etwa 12 TB/Woche. Auch ist die Auswertung dieser Daten noch keinesfalls etablierter Standard. Aktuelle Forschungsbereiche in der Künstlichen Intelligenz und zur Anwendung von maschinellem Lernen sind hier besonders gefragt (MARTIN et al. 2018).

2.2 Technische Installation

Bei einer Messung mit dem DAS-Verfahren ist nicht viel von der eigentlichen Messtechnik zu sehen, außer einer Messeinheit, die an das Kabel angeschlossen wird, und ggf. ein Kontrollmonitor. Am Beispiel des Telegrafenberg Campus in Potsdam können die Komponenten eines Experiments veranschaulicht werden (Abb. 3). Nach Überlassung der Liegenschaft Albert-Einstein-Straße durch das Land Brandenburg und die Stadt Potsdam an das GFZ wurde im

Rahmen der Ertüchtigung 2018 die Liegenschaft an das Rechenzentrum auf dem Telegrafenberg Campus mit neuen Glasfaserkabeln (Abb. 3a) angeschlossen. Per Horizontalbohrung war die Verbindung zwischen den Gebäuden geschaffen und Hohlrohre (Abb. 3b) verlegt worden, die die Datenleitungen beinhalten. Im Serverraum zur Kabelübergabe (Abb. 3c) kann jederzeit ein lasergepulstes Mess- und Aufnahmegerät angeschlossen und per Monitor die Messung überwacht werden (Abb. 3d). Verwendet man bereits existierende Telekommunikationskabel, muss solch ein Zugang mit dem entsprechenden Netzbetreiber verhandelt und technisch an entsprechenden Zugangspunkten möglich gemacht werden.

2.3 Charakteristische Signale in den Rohdaten

Während einer Messung kann man von einem Kontrollmonitor die aktuelle Deformationsrate entlang der Messstrecke anzeigen lassen. Charakteristische Signale können dabei für unterschiedliche Ereignisse erkannt werden. Ein Aufbau mit mehreren Komponenten am Ätna Vulkan (Abb. 4, KRAWCZYK et al. 2020) veranschaulicht sowohl natürliche als auch künstlich erzeugte Ereignisse. Das typische Zickzack-Muster vom städtischen Fahrzeugverkehr (Abb. 4b, Fahrzeuge in entgegengesetzter Richtung) setzt sich deutlich vom gleichmäßigen Rauschen im marinen Bereich (Abb. 4c, ähnliche Signale auf allen Spuren) und den hochaufgelösten Ereignissen am Vulkankrater (Abb. 4d, Erdbeben und Explosionen) ab. Die gezeigten Verformungsraten sind alle im Frequenzbereich zwischen 0,01-0,5 Hz abgebildet, aber für sehr unterschiedliche Reichweiten (12/25/1 km), die es in Abb. 4b-d auch hinsichtlich ihrer Auflösung zu beachten gilt. Detaillierte Auswertungen zu den am Ätna gewonnenen Datensätzen finden sich in CURRENTI et al. (2021) und JOUSSET et al. (2021).

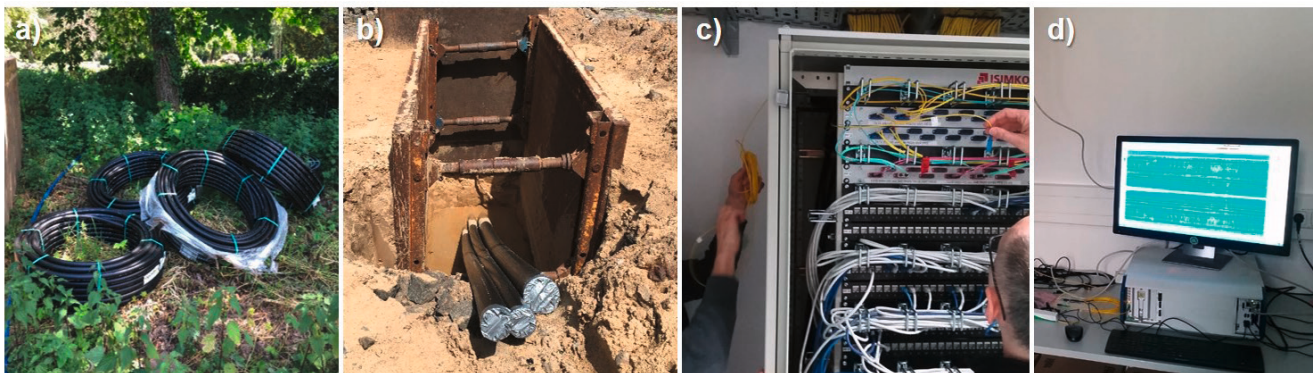


Abb. 3: Verlegen eines Glasfaserkabels zwischen Campus Telegrafenberg und Außenstelle Albert-Einstein-Straße anlässlich der Ertüchtigung der Liegenschaft in 2018: a) Glasfaserkabel vor Einbau, b) Hohlrohre zur unterirdischen Kabelverlegung, c) Kabelübergabe im Serverraum, d) DAS-Aufnahmeeinheit mit Kontrollmonitor. (Photos: M. Wanjek, GFZ).

Fig. 3: Installation a fibre optic cable between the Telegrafenberg campus and the Albert-Einstein-Strasse branch office on the occasion of the property upgrade in 2018: a) Fibre optic cable before installation, b) hollow tubes for underground cable laying, c) cable handover in the server room, d) DAS recording unit with control monitor. (Photos: M. Wanjek, GFZ).

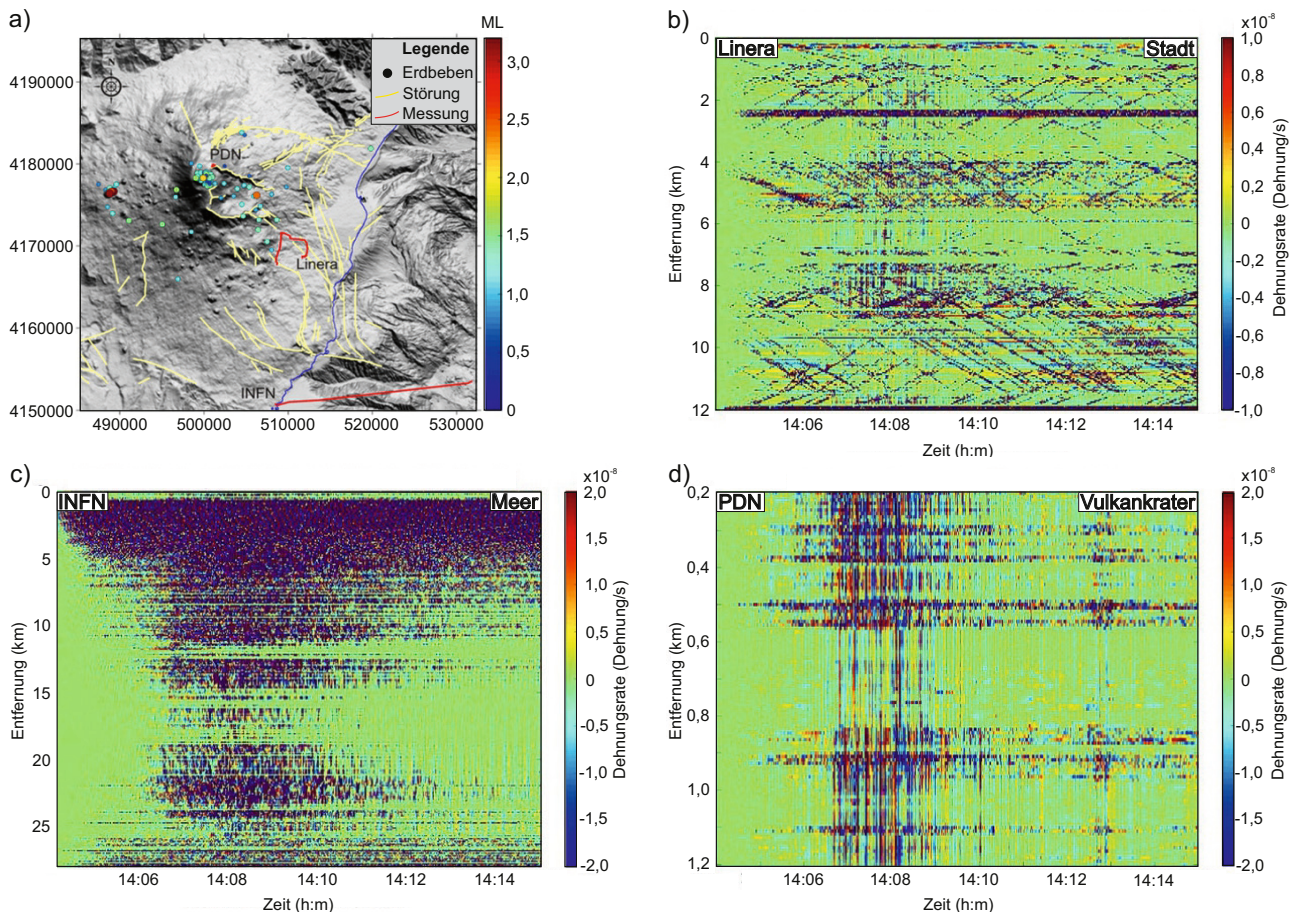


Abb. 4: Typische DAS-Signale, die 2019 am Ätna-Vulkan aufgezeichnet wurden: a) Karte des Ätna mit den drei gezeigten Messlokalationen (rote Markierungen), b) städtische Messung in Linera, c) untermeerische Messung vor dem Hafen von Catania, d) lokale Aufstellung nahe am Vulkankrater (nach KRAWCZYK et al. 2020; zur Auswertung siehe CURRENTI et al. 2021).

Fig. 4: Typical DAS signals recorded at the Etna volcano in 2019: a) map of Etna with the three survey locations shown (red markings), b) urban measurement in Linera, c) submarine measurement off the port of Catania, d) local deployment close to the volcanic summit (after KRAWCZYK et al. 2020; for detailed analysis see CURRENTI et al. 2021).

3 Island: Geodynamik und Geotechnik

Island ist von intensiver seismischer Aktivität in Verbindung mit dem nordatlantischen Riftprozess geprägt, der sich in Verwerfungen und Vulkansystemen mit jungtertiären bis rezenten Basaltformationen manifestiert (SAEMUNDSSON 1979). Neben der geodynamischen Entwicklung ist vor allem die Nutzung dortiger geothermischer Lagerstätten von wissenschaftlichem und praktischem Interesse (SIGMUNDSSON et al. 2020).

3.1 Abbildung von Störungszonen, die nicht an der Oberfläche sichtbar sind

Die Reykjanes-Halbinsel im Südwesten Islands liegt innerhalb der Westlichen Vulkanzone. Die tektonische Dehnungsaktivität zwischen der Nordamerikanischen und der Eurasischen Platte (2 cm/Jahr, seit 6–7 Ma) führt hier zu ei-

ner Vielzahl von aktiven Störungszonen. Hier wurden 2017 aktive seismische Messungen entlang eines Profils und passive seismische Messungen mit räumlich aufgestellten Geophonen und Seismometern durchgeführt. Das Ziel war es, die Struktur und Dynamik des Untergrunds zu erforschen, der durch mehrere Lavaflüsse und Störungssysteme geprägt ist, was eine geophysikalische Herausforderung für die Abbildung darstellt.

Zur Methode der ortsverteilten Dehnungsmessung (DAS) wird in der Arbeit von JOUSSET et al. (2018) erläutert, wie kontinuierlich seismische Signale von natürlichen und künstlichen Quellen mit nur 4 m Registrierabstand entlang eines 15 km langen Glasfaserkabel-Layouts für neun Tage aufgezeichnet und ausgewertet werden. Mit herkömmlichen Geophonauslagen hätte solch ein Experiment einen um Größenordnungen höheren, auch finanziellen Aufwand bedeutet: Verfügbarkeit und Transport von 3750 einzelnen Geophonen inkl. Peripherie und Aufzeichnungseinheiten, Einsatz vieler Feldteams

und Fahrzeuge sowie sehr zeitintensive Aufbau- und Abbauphasen. Die Datenerfassung erfolgte mit einem Standard-Telekommunikationskabel, das 1994 verlegt worden war. Das Kabel liegt in ca. 0,5 m Tiefe, und dessen Kopplung an den Untergrund wurde mit einem einfachen theoretischen Ansatz (REINSCH et al. 2017) abgeschätzt. Die Dehnungsübertragung zwischen dem Untergrund und der optischen Faser hat den bei der Messung in Island erhaltenen Frequenzbereich und die Signalamplitude nahezu perfekt erfasst.

Entlang der 15 km langen Messstrecke wurden räumlich unverzerrte, breitbandige Nano-Dehnungsdaten gemessen (Abb. 5). Das optische Telekommunikationskabel passiert eine Störungszone, die von der Schadenszone an der Oberfläche bekannt ist (Abb. 5a). In dieser Zone beobachteten die Autoren eine Zunahme sowohl der Dauer als auch der Amplitude von stehenden Wellen (Reflexionen), die durch lokale Erdbeben angeregt werden (Abb. 5b). Solche stehenden Phasen werden oft in großräumigen Messungen gesehen, aber nicht mit dieser hohen räumlichen Abtastung von wenigen Metern. Die räumlich dichten Glasfaseraufzeichnungen erlauben es daher, Details der Ausbreitung der Phasen von Erdbebenwellen innerhalb der Störungszone zu verfolgen (JOUSSET et al. 2018). Für das Fallbeispiel Island wird bewiesen, dass die an der Oberfläche mit ca. 75 m Breite kartierte Störungszone tatsächlich einen größeren räumlichen Bereich abdeckt und sich im Untergrund ca. 50 m weiter nach Westen erstreckt. Dieses Phänomen kann besonders dann von Bedeutung sein, wenn beispielsweise Gutachten zur Untergrundstabilität oder an sensiblen Infrastrukturen eine Aussage darüber treffen müssen, welches Schadensperimeter (die Ausdehnung der zu schützenden Flächen) angesetzt werden soll. Auch können durch verborgene Störungen Einflussbereiche und Auswirkungen von einzelnen Erdbebenereignissen oftmals erst nachträglich verstanden und in geodynamischen Modellen berücksichtigt werden.

3.2 Einfluss von Fahrzeugen auf den Untergrund

Neben den oben angesprochenen Signalen aus dem geologischen Untergrund gibt es auch eine Vielzahl von durch den Menschen erzeugten Signale. Erschütterungen durch den Straßenverkehr verursachen im Allgemeinen eine kleine Deformation der Erdoberfläche. Die Modellierung auf der Basis von DAS-Daten kann helfen, diesen Einfluss in Zukunft zu bestimmen. In einem ersten Test modellierten JOUSSET et al. (2018) die Wirkung des Messwagens auf den Boden (Gewicht ca. 2,2 t).

Die Form der Dehnungsspur mit der Zeit an einem Ort (Abb. 6) ist von der Geschwindigkeit und dem Gewicht eines Fahrzeugs, von dessen Abstand zum Kabel und von den elastischen Eigenschaften des Bodens, z. B. der P-Wellen-Geschwindigkeit abhängig. Während die elastischen Eigenschaften den absoluten Dehnungswert beeinflussen, der entlang des Lichtwellenleiters aufgezeichnet wird, verändert die Geschwindigkeit des Fahrzeugs die Dauer der Deh-

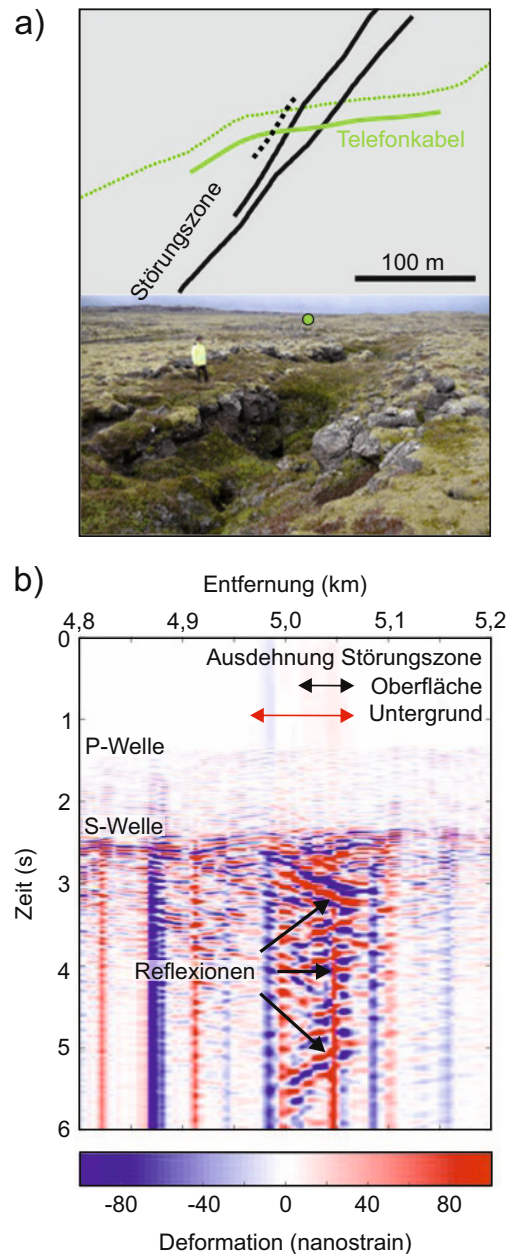


Abb. 5: Störungszone in Island. In Ergänzung zum Oberflächenausbiss der Störung (a) zeigen die neuen Daten Beweise für blinde Störungsäste (b) (nach JOUSSET et al. 2018).

Fig. 5: Fault damage zone on Iceland. In addition to the surface exposure of the fault (a), the newly acquired data evidence hidden fault traces (b) (modified after JOUSSET et al. 2018).

nungsanomalie. Die gemessene Verformungskurve passt am besten für das Modell eines mit 25 km/h fahrenden Autos mit einer P-Wellen-Geschwindigkeit des Untergrunds von 750 m/s (rote Linie in Abb. 6). Zusätzlich zu solch einer zeitlichen Analyse, können die Daten auch im räumlichen Bereich (mehrere benachbarte Spuren zur gleichen Zeit) mit dem gleichen Ergebnis analysiert werden. Da die Übereinstimmung zwischen den Beobachtungen und der verein-

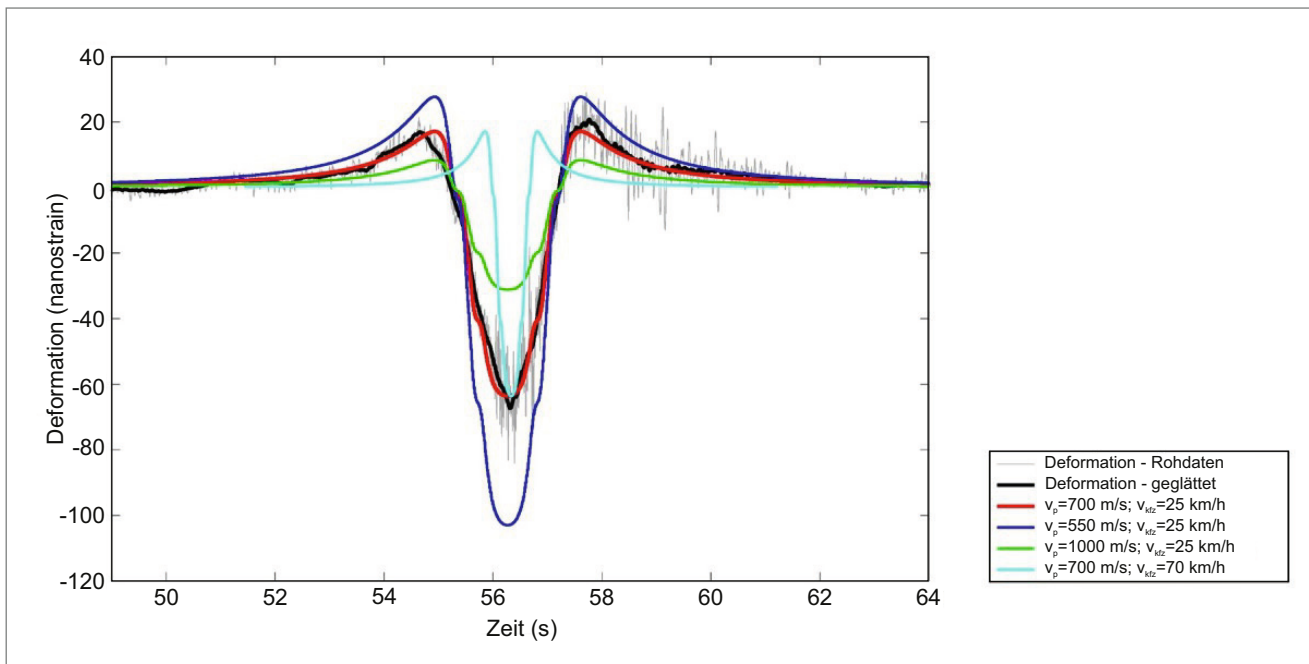


Abb. 6: Deformation des Bodens an einem Messpunkt durch ein vorbeifahrendes Fahrzeug (Geländefahrzeug mit ca. 2,2 t Gewicht) für verschiedene Geschwindigkeiten und Bodeneigenschaften. Hellgraue Kurve: aufgezeichnete Daten; dicke schwarze Kurve: dieselben Daten, aber geglättet; farbige Kurven: modellierte Verformung für ein Fahrzeug, das sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit entlang einer Straße und bei verschiedenen P-Wellen-Bodengeschwindigkeiten bewegt (Jousset et al. 2018).

Fig. 6: Deformation of the ground at a survey location due to a passing car (4WD car of ca. 2.2 t weight) for different velocities and subsurface properties. Grey light curve: recorded data; thick black curve: same data but smoothed; colour curves: modelled deformation for a car moving at different speed along a road for various P-wave ground velocities (Jousset et al. 2018).

fachten Vorhersage überraschend gut ist, sollten zukünftige, verfeinerte Modelle eine wesentlich bessere Bestimmung vom Impakt und von oberflächennahen elastischen Eigenschaften entlang langer Profile ermöglichen können.

4 Groß Schönebeck: Tiefe Geothermie

Das Land Brandenburg ist Teil des Norddeutschen Tieflands und landschaftlich durch Moränenlandschaften und Urstromtäler geprägt (STACKEBRANDT & FRANKE 2015). Tektonisch betrachtet ist Brandenburg ein Teil des Norddeutschen Beckens, das sich nach dem Rückzug des Zechsteinmeeres mit bis zu 5 km Mächtigkeit auf sedimentärem und vulkanischem Rotliegend abgelagert hat (DEKORP-BASIN RESEARCH GROUP 1999), unterlagert von Baltica, Avalonia und Armorica. Groß Schönebeck liegt auf den Hochflächen des Jungmoränengebiets nördlich des Eberswalder Urstromtals (STACKEBRANDT & FRANKE 2015).

Forschungsfragen zu geothermischen Energiesystemen sind breit aufgefächert und umfassen u. a. die Exploration, Erschließung und Nutzung von oberflächennahen und tiefen Reservoirs, Reservoirmonitoring, die materialtechnische Komplettierung sowie die modelltechnische Abbildung des Gesamtsystems. Im Land Brandenburg ist die

Geothermie-Forschungsplattform Groß Schönebeck des GFZ ein international gefragter Teststandort und Nukleus (inter-)nationaler Kooperationen (Übersicht in BLÖCHER et al. 2016, RISSDOM 2021). In einem der jüngsten Projekte am Standort haben wir sowohl eine konventionelle 3-D Reflexionsseismik von der Oberfläche aus gemessen und weiterführend bearbeitet (KRAWCZYK et al. 2019, BAUER et al. 2020) als auch die Glasfaser-Technologie im Bohrloch zur vertikalen seismischen Profilierung (VSP) eingesetzt und neue Methoden der Datenbearbeitung entwickelt (HENNINGES et al. 2021, MARTUGANOVA et al. 2021).

Die Zielstellung dieser Messungen war es, eine bessere Charakterisierung des Untergrunds und insbesondere des in etwa 4 km Tiefe liegenden geothermischen Reservoirs zu erreichen, um einen weiteren Ausbau der Forschungsplattform für die geothermische Exploration zu ermöglichen. Dies ist auch deshalb ein ambitioniertes Vorhaben, da es bisher keine in der internationalen Literatur veröffentlichten Daten aus DAS-VSP Messungen in der tiefen Geothermie gibt, die solch große Zieltiefen erreichten und in zwei Bohrungen gleichzeitig gemessen werden konnten. Methodisch standen zusätzlich noch ungeklärte Fragen wie die Ankopplung des Sensorkabels, die Übertragung der Dehnung auf äquivalente VSP-Daten, die mit Geophonketten im Bohrloch gemessen werden und die Unterdrückung von Störsignalen im Fokus.

Die Korridorstapelungen für die DAS-Messungen in den Bohrlöchern GrSk3 und GrSk4 zeigen, dass die aufgezzeichneten Reflexionen sehr gut über die gesamte Tiefe (HENNINGES et al. 2021) und somit der bekannten Lithologie (KRAWCZYK et al. 2019) korrelieren. Die detaillierte Charakterisierung des Reservoirbereichs mit den neuen Daten bildet die Reflexionen der Zechsteinbasis sehr klar ab (Abb. 7, Z1-3), auch wenn noch ein Grundrauschen die Daten stört. Das geothermische Reservoir beginnt mit einem Sandsteinintervall in 4 km Tiefe (Abb. 7, R3), das von Vulkaniten unterlagert wird (Abb. 7, H6).

Bei VSP-Messungen, die ein frei hängendes Kabel im Bohrloch verwenden, kommt es im Gegensatz zu Messungen, die ein hinter der Verrohrung eingebautes Kabel verwenden, zu auffälligen Störsignalen, die die Abbildungsqualität einer Messung stark beeinträchtigen können. Ein Nachhall im Kabel (*ringing*) bei drahtgebundenen, verteilten akustischen Dehnungsmessungen kommt möglicherweise dadurch zustande, dass die temporäre Kabelverlegung Probleme mit der Ankopplung verursacht und dadurch zusätzliches kohärentes Rauschen mit aufzeichnet. Das so ausgebildete, typische Zickzack-Muster wurde auch

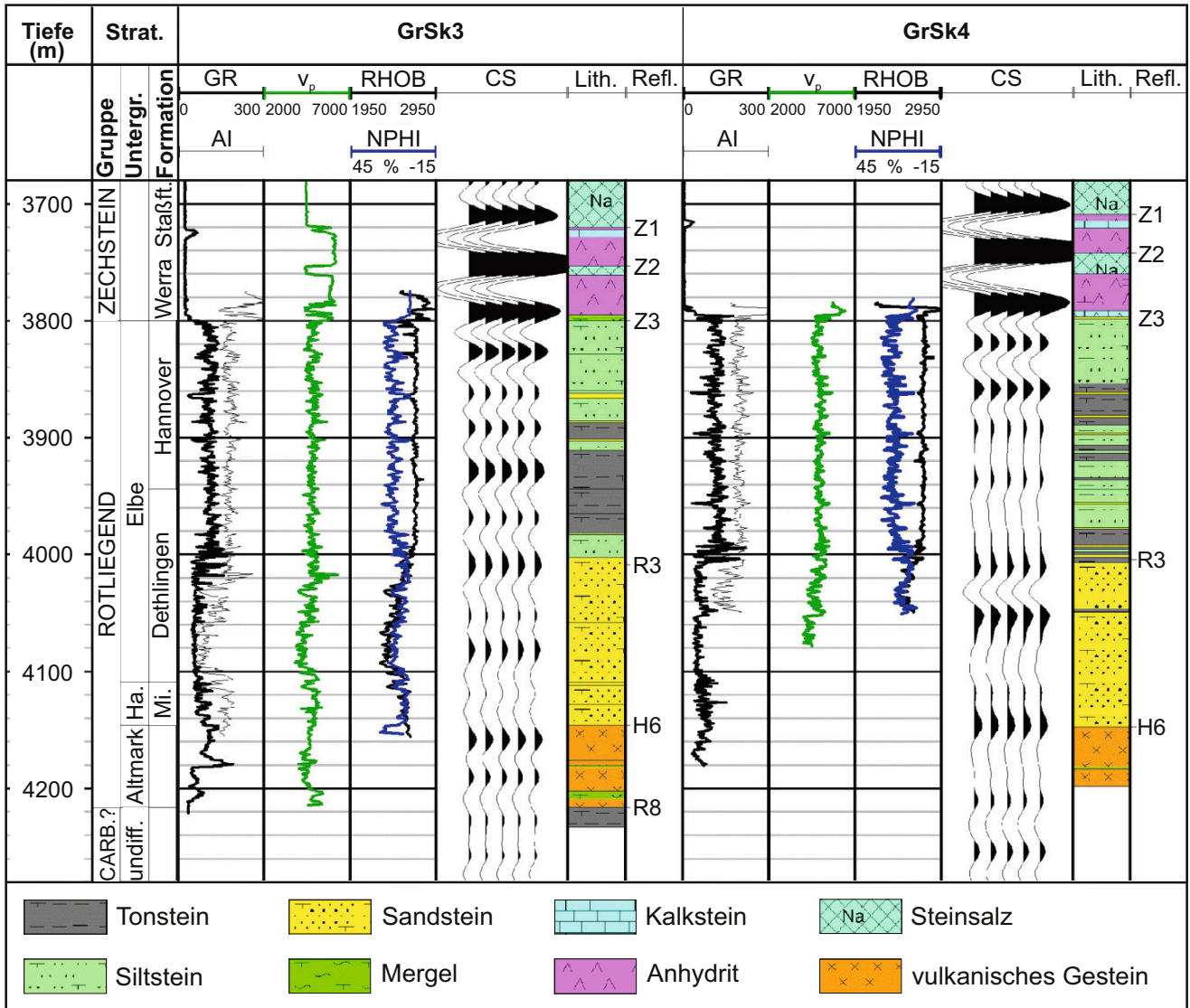


Abb. 7: Reservoirabbildung mit seismischen VSP-Messungen unter Verwendung der DAS-Technologie in Groß Schönebeck in den Bohrungen GrSk3 und GrSk4 (aus HENNINGES et al. 2021). Die Bohrlochsondierungen (GR: Gammastrahlung, Vp: Kompressionswellengeschwindigkeit, RHOB: Dichte, AI: akustische Impedanz (aus Vp und RHOB berechnet), NPHI: Neutronenporosität) bilden zusammen mit den Korridorstapelungen (CS) die lithologische (Lith.) und seismische Ansprache der Reflektoren (Refl.) sehr gut ab. Strat.: Stratigraphie.

Fig. 7: Reservoir imaging with seismic VSP measurements using the DAS technology in Groß Schönebeck in boreholes GrSk3 and GrSk4 (from HENNINGES et al. 2021). Well logs (GR: gamma ray, Vp: sonic velocity, RHOB: bulk density, AI: acoustic impedance (calculated from bulk density and sonic velocity), NPHI: neutron porosity) image together with corridor stacks (CS) the drilled lithology (Lith.) and seismic reflectors (Refl.) very well. Strat.: stratigraphy.

in den wenigen anderen, weltweit vergleichbaren DAS-Messungen registriert (MILLER et al. 2012, HARTOG et al. 2014, YU et al. 2016).

Um dieses Problem nachträglich zu beheben, haben MARTUGANOVA et al. (2021) eine numerische Lösung entwickelt. In einem zweistufigen Ansatz wird das Rauschen als physikalisches Modell bestimmt, um dann von den gemessenen Daten subtrahiert zu werden. Das Eingangssignal wird dazu in eine gewichtete Summe von Gabor-Funktionen zerlegt und diese hinsichtlich der Eigenschaften Frequenz, Amplitude und Zeit analysiert. Das bietet die Möglichkeit, Anteile im Signal zu unterscheiden und das durch das schwingende Kabel verursachte Rauschen darzustellen. Dieser Ansatz wurde erstmals erfolgreich auf die DAS-VSP-Daten in Groß Schönebeck angewendet (Abb. 8).

Die gemessenen Rohdaten (Abb. 8a) beinhalten Nutzsignal plus Rauschen. Werden die Störsignale eindeutig erkannt (Abb. 8b), können durch dessen Subtraktion die Reflexionen wichtiger Horizonte wesentlich deutlicher abgebildet werden (Abb. 8c). Der Effekt ist besonders in geringen Tiefen stark ausgeprägt, wo die hohen Rauschamplituden das Signal fast komplett überdecken: der Buntsandstein konnte erst nach der Bearbeitung klar erkannt und korreliert werden (Abb. 8c). Dies sichert auch weiterführende Interpretationen zusätzlich ab.

In Groß Schönebeck wurde das Messkabel in zwei Bohrlöcher gehängt und nicht, wie meist üblich, hinter der Verrohrung einzementiert. Der hier vorgestellte und geprüfte

Wireline-Ansatz erlaubt somit neue Beobachtungsmöglichkeiten auch in alten Bohrlöchern und für eine Vielzahl von Zwecken. Die DAS-Methode ermöglicht zudem Messungen bei erhöhten Temperaturen von bis zu 150°C und führte auch hier wieder zu erheblichen Zeit- und Kosteneinsparungen im Vergleich zum Einsatz eines konventionellen Bohrloch-VSP.

Die vorgestellte Glasfaser-Technologie kann nicht nur in der Vorerkundung, sondern auch in der Überwachung von zukünftigen Produktionsbohrungen eine wesentliche Rolle spielen, um die Energiewende sicherer zu gestalten und beispielsweise für Brandenburg ein geowissenschaftliches Erkundungsprogramm zur Erschließung tiefer geothermischer Quellen voranzubringen (ACKSEL et al. 2020).

5 Potsdam – Urbane Geophysik für eine smarte Zukunft

Das Stadtgebiet von Potsdam bietet durch den geplanten Ausbau der Breitbandinfrastruktur und neue Messungen zur energetischen Erschließung des Untergrunds ein ideales angewandtes Testfeld für die Nutzung vorhandener Telekommunikationsinfrastrukturen zur Weiterentwicklung der Landeshauptstadt, mit dem Ziel klimaneutral zu werden. Die hohe Dichte von Telekommunikationsnetzen in städtischen Gebieten steht oft im Gegensatz zur meist unzureichend bekannten lokalen Geologie in Städten. Deshalb ist der Einsatz der DAS-Technologie eine zeitgemäße Lösung, diese Lücke effizient zu schließen und neue Erkenntnisse über den Untergrund zu erlangen. Zusätzliche technische

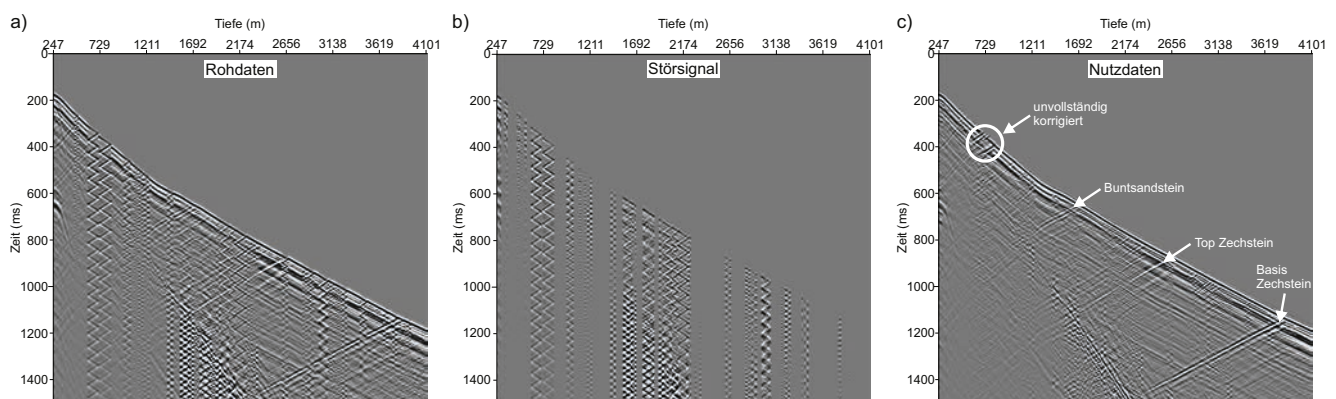


Abb. 8: Vergleich von unbearbeiteten und bearbeiteten DAS-VSP-Daten in Groß Schönebeck für eine einzelne Vibrationspunktanregung (für mehr Detail siehe MARTUGANOVA et al. 2021). Die drei Paneele zeigen von links nach rechts a) die Rohdaten mit allen gemessenen Effekten, b) das Modell der Störsignale und c) die bereinigten Daten als Subtraktion von a) minus b). Es bleiben nur wenige, unvollständig korrigierte Bereiche (Kreis), sodass einzelne Reflexionen insbesondere in geringen Tiefen wesentlich besser interpretiert werden können.

Fig. 8: Comparison of unprocessed and processed DAS-VSP data in Groß Schönebeck for a single vibration point excitation (for more detail see MARTUGANOVA et al. 2021). The three panels show from left to right a) the raw data with all measured effects, b) the noise model, and c) the cleaned data as subtraction of a) minus b). Only a few incompletely corrected areas (circle) remain, so that individual reflections can be interpreted much better, especially at shallow depths.

Fragen sind beispielsweise die Lokalisierung vorhandener Kabel und die benötigte Genauigkeit, die Aufnahmeempfindlichkeit und die Reichweite der aktiven Stimulation an der Erdoberfläche.

5.1 Kontrollierte Sprengung von Weltkriegsbomben im Stadtzentrum

Eine günstige Gelegenheit, die DAS-Technologie im Potsdamer Untergrund zu testen, ergab sich aus der Sprengung zweier Weltkriegsbomben im Juni/Juli 2020, die im Stadtzentrum von Potsdam nahe des Hauptbahnhofs gefunden worden waren. In Absprache mit dem Kampfmittelbeseitigungsdienst des Landes Brandenburg (KMBD) und der Energie und Wasser Potsdam GmbH (EWP) gelang es, innerhalb von nur eineinhalb Tagen eine geophysikalische Kampagne zu organisieren. Damit sollte die Detonation als Signalquelle für eine Messung im städtischen Bereich genutzt werden, um zu testen, wie sich solch ein Signal abbildet und wie weit das Signal verfolgt werden kann. Für die Messkampagne wurden 15 Geophone auf dem Telegrafenberg und 3 Geophone in 10, 50 und 100 Meter Entfernung vom Schusspunkt aufgestellt. Die Einbeziehung von zwei Glasfasern des städtischen Telekommunikationsnetzes, an die kurzfristig Messgeräte angeschlossen werden konnten, lieferte eine ca. 9 km lange Messlinie.

Die Detonation der 250 kg schweren Bombe konnte entlang der gesamten Messstrecke erfasst werden (Abb. 9). Wie weit das Signal maximal hätte aufgezeichnet werden können, kann nicht abgeschätzt werden, da die Distanz

von 9 km noch zu kurz dafür war. In den Rohdaten ist der Verbrämungsschuss, der vor der Sprengung gemacht wurde, ebenfalls sehr gut zu erkennen. Die kleine Ladungsmenge, die oberirdisch gezündet wurde, kann entlang einer Ausdehnung von insgesamt ca. 4 km als seismisches Signal detektiert werden. Dies belegt die enorme Empfindlichkeit dieser Messtechnik. Das typische Streifenmuster von Fahrzeugen, die sich in dem dargestellten Zeitraum entlang der Messstrecke bewegt haben, ist ebenfalls vorhanden (Abb. 9), jedoch in viel kleinerer Dichte als im Beispiel vom Ätna (vgl. Abb. 4), da bei der Bombensprengung in Potsdam ein Sperrkreis eingerichtet und der Verkehr umgelenkt war.

5.2 Urbane Erkundung zur Erschließung des geothermischen Potenzials

Nachdem die Testmessungen bei den Sprengungen in Potsdam so positiv verlaufen waren, hat das GFZ Potsdam mit dem örtlichen Wärmeversorger Energie & Wasser Potsdam (EWP GmbH) seine Kooperation vertieft. Die Landeshauptstadt Potsdam wird exemplarisch als urbaner Raum u. a. im Rahmen des Projekts geoPuR untersucht und insbesondere das geologische Modell des Potsdamer Untergrunds nach und nach verfeinert (GEOPuR 2021). Das Ziel unserer Kooperation ist die Erkundung und Nutzung geothermischer Ressourcen, um langfristig die Integration tiefer geothermischer Wärmequellen und -speicher in die Potsdamer Fernwärmeversorgung sicherzustellen, da hier die Einsparpotenziale am höchsten sein werden (SWP 2021).

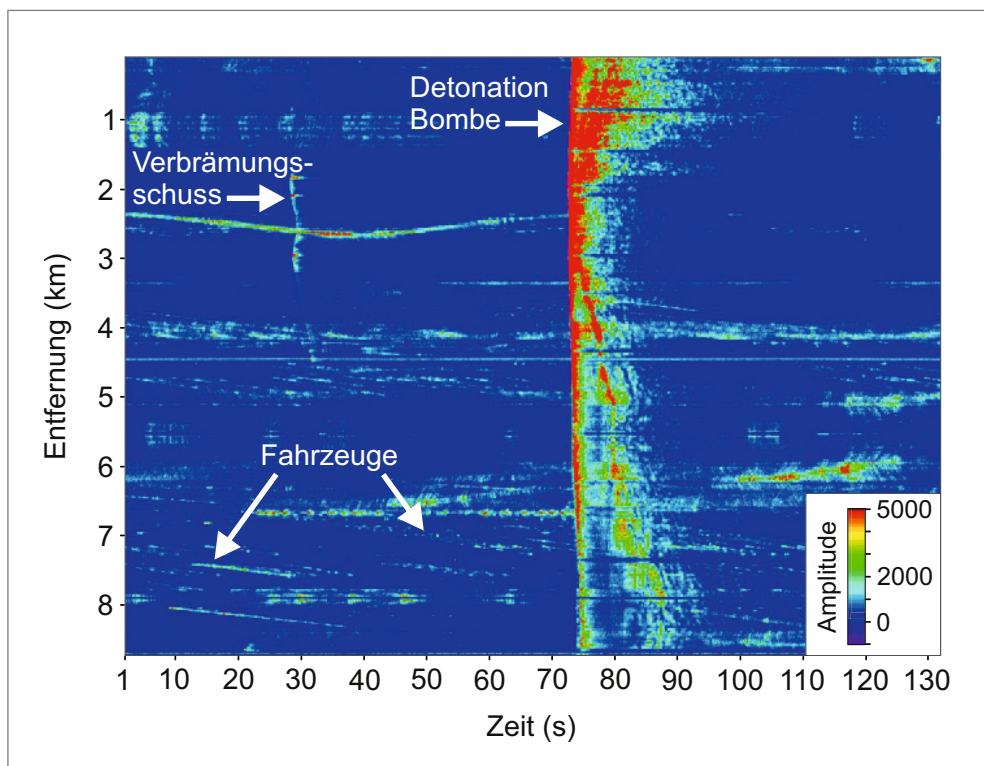


Abb. 9: DAS-Aufzeichnung der kontrollierten Sprengung einer 250 kg schweren Weltkriegsbombe in Potsdam entlang einer 9 km langen Messstrecke in einem vorhandenen Telekommunikationskabel.

Fig. 9: DAS registration of the controlled detonation of a 250 kg world war bomb in Potsdam along a 9 km long profile in an existing telecommunication cable.

Vibroseismik-Messungen der EWP GmbH zur geothermischen Exploration in Potsdam fanden im Vorfeld der Niederbringung einer Geothermie-Bohrung im Dezember 2020 statt (Abb. 10). Während die beauftragten Vibratorfahrzeuge gezielt seismische Signale entlang von vier Profilen anregten (Abb. 10a) und diese konventionell mit Geophonauslagen aufgezeichnet wurden, haben Zusatzmessungen entlang eines Glasfaserkabels durch das GFZ stattgefunden (KRAWCZYK et al. 2021b). Das seismische Signal wurde in Echtzeit vor Ort überprüft, um eine funktionierende Registrierung sicherzustellen. Entlang der 6.5 km langen faseroptischen Messstrecke werden die angeregten Sweeps der Vibratoren klar beobachtet und sind wesentlich stärker ausgeprägt als die Streifenmuster durch den vorbeifahrenden Verkehr (Abb. 10b). Die Bearbeitung und Auswertung der 2-D seismischen Daten findet durch die EWP statt, das Zusatzexperiment wird zur Etablierung von technischen und Processingabläufen genutzt (WOLLIN et al. 2021, KRAWCZYK et al. 2021b). Die Auswertungen werden zum Potsdamer Untergrundmodell beitragen und die Optimierung einer geothermischen Erschließung im städtischen Raum voranbringen.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Die wissenschaftliche Bedeutung der innovativen Technik der ortsverteilten akustischen Dehnungsmessungen (*Distributed Acoustic Sensing*, DAS) und der nutzbare Transfer in die Gesellschaft liegen in der Überwachung kritischer Systemparameter 1) zur Minderung der seismischen und vulkanischen Gefährdung; 2) zur Dynamik des Untergrun-

des und der Landoberfläche (z. B. Erdfälle, Hangrutschungen) inklusive der Entwicklung geotechnischer Lösungen; und 3) für die sichere Nutzung des Untergrundes (z. B. Energiegewinnung, Energiespeicherung).

Das in diesem Artikel umrissene Potenzial der Methode für räumlich und zeitlich kombinierte engmaschige Beobachtungen ist zugleich eine große Herausforderung in Bezug auf Datenspeicherung, Datenhandhabung und Berechnung. Da die Speicherung und Auswertung von DAS-Daten noch kein etablierter Standard sind, erlangen mathematisch und IT-orientierte Forschungsarbeiten in diesem Kontext eine große Bedeutung. Künstliche Intelligenz und die Anwendung von maschinellem Lernen werden besonders benötigt, um beispielsweise mit neuronalen Netzen die Abtastung des seismischen Wellenfeldes in kurzer Zeit und möglichst in Echtzeit durchführen zu können.

Generell werden die Überwachung bei der Nutzung des oberflächennahen Untergrunds, die Vulkanüberwachung, die Kontrolle unterirdischer Explosionen, die Gefährdungsbeurteilung und -überwachung sowie die globale Seismologie unter Verwendung transatlantischer Kabel von derartigen Technologien profitieren. Vorstellbar sind auch Experimente zum Vergleich neuer Instrumentenentwicklungen, die Kopplung mit Sensoren in der Rotationsseismologie, detaillierte Untersuchungen der Eigenschaften von Rayleigh-Wellen und die Inversion des kompletten Wellenfeldes.

Neben dieser Vielzahl von eher allgemein gehaltenen (geo-)wissenschaftlichen Fragestellungen, werden mit Bezug auf das Land Brandenburg und benachbarte Gebiete die

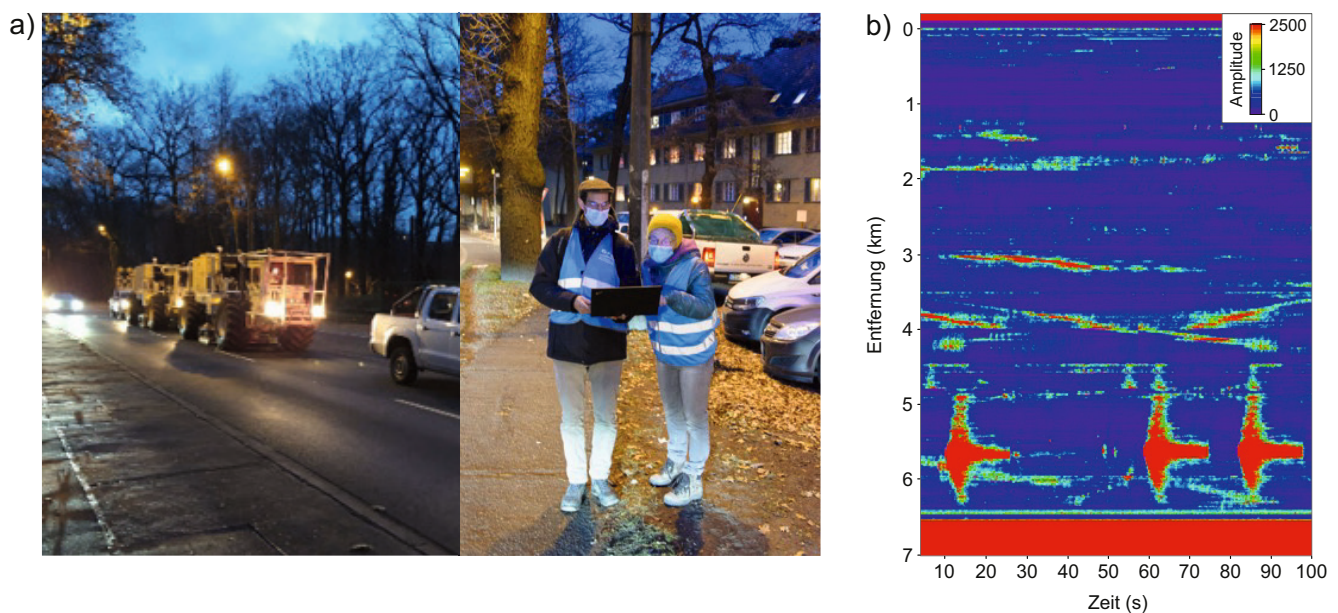


Abb. 10: Vibroseismik-Messungen der EWP GmbH zur geothermischen Exploration in Potsdam. Die Anregung seismischer Signale durch Vibratorfahrzeuge (a) wird entlang eines Glasfaserkabels in Echtzeit vor Ort sichtbar (b). (Photos: C. Cunow, GFZ).

Fig. 10: Vibroseismic survey of EWP GmbH for geothermal exploration in Potsdam. The seismic signal generated by the vibrator trucks is visualized along the nearby fibre-optic cable in real-time and on site (b). (Photos: C. Cunow, GFZ).

Anwendungsbereiche Senkungsstrukturen, Oberflächeneinbrüche, Hangstabilitäten, stillgelegten Tagebaue, Geothermie sowie Untergrund-Speicherung (Wasserstoff, CO₂, etc.) als sehr relevant erachtet, die sowohl in der Forschung als auch im Praxisbezug von der neuen DAS-Technologie stark profitieren werden können.

Zusammenfassung

Die effiziente Erkundung der Erdkruste und die Vorhersage von Naturgefahren profitieren von dichten Messungen. Seismologische Techniken liefern Bodenbewegungsdaten, während die aktive Seismik auf die strukturelle Abbildung und zunehmend auf die Bestimmung physikalischer Eigenschaften abzielt. Dichte Netze existieren in Explorationsgebieten für Kohlenwasserstoffe und in einigen Vulkangebieten, aber kaum in städtischen Gebieten oder an Küsten, wo die Datenerfassung schwieriger ist. Das wird jetzt durch die dynamische Dehnungsbestimmung mit konventionellen Glasfaserkabeln, die für die Telekommunikation eingesetzt werden, möglich. Diese innovative Technologie wird in jüngster Zeit weltweit stark für die Krustenexploration sowie Erdbebenortung entwickelt und liefert wichtige Datensätze für das Verständnis der Dynamik des Untergrunds, insbesondere in Küstenregionen und städtischen Gebieten, die bisher messtechnisch schwer zu erfassen sind. Auch die Entwicklungen weiterer Anwendungen in Richtung Smarte Energie (z. B. in Bezug auf Geothermie, Untergrundspeicher) und Smarte Städte (z. B. in Bezug auf U-Bahn, Autoverkehr, Diebstahlsicherung) sind in Sicht, die für einen breit aufgestellten gesellschaftlichen Nutzen entwickelt werden.

Summary

Efficient crustal exploration and natural hazard prediction benefit from dense surveys. Seismological techniques provide ground-motion data, while active seismics aims at structural imaging and increasingly on physical properties determination. Dense networks exist in hydrocarbon exploration plays and on some volcanoes, but rarely in urban and coastal areas where data acquisition is more challenging. This is now becoming possible: dynamic strain determination can be carried out with conventional fibre optic cables used for telecommunication. This new tool is lately strongly developed worldwide, for crustal exploration and for earthquake location. Thereby, this method provides key records for understanding subsurface dynamics, especially in coastal and urban areas that still experience measurement gaps. The developments of further applications towards smart energy (e. g., related to geothermics, subsurface storage) and smart cities are also in sight being developed for wider societal benefit.

Danksagung

Das hier vorgestellte Wissen wurde in vielen verschiedenen Projekten erzeugt. Die dazu notwendigen finanziellen Mittel wurden durch die Europäische Union (608553), die Projekte SENSE (BMWi 03EE4009), geoPuR (EFRE 85037956) und GeConnect (BMWi 0324269) sowie den Iceland Geosurvey und das GFZ Deutsches GeoForschungsZentrum bereitgestellt. Im wissenschaftlichen und technischen Bereich haben sich dankenswerterweise insbesondere die Mitglieder aus der Glasfaser-Gruppe für die sehr kurzfristig angesetzten Messungen stark engagiert: C. Wollin, T. Reinsch, M. Lipus, S. Lüth, P. Jousset, C. Cunow, A. Siebert, S. Fuchs und M. Wanjek. Die gute Kooperation mit der Energie und Wasser Potsdam GmbH (EWP), der ILB, dem Kampfmittelbeseitigungsdienst Brandenburg, dem LBGR Brandenburg und die Unterstützung durch die betroffene Bevölkerung und Organisationen in Groß Schönebeck und Potsdam wird hier ausdrücklich hervorgehoben. Ihnen allen sei an dieser Stelle freundlich gedankt.

Literatur

- ACKSEL, D., HUENGES, E., REINSCH, T., BOHNHOFF, M., HARMS, U., KRAWCZYK, C. & M. SCHECK-WENDEROTH (2020): Geowissenschaftliches Erkundungsprogramm zur Erschließung tiefer geothermischer Quellen in den ostdeutschen Bundesländern. – Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, <https://doi.org/10.2312/GFZ.4.0.2020.001>
- AJO-FRANKLIN, J. B., DOU, S., LINDSEY, N. J., MONGA, I., TRACY, C. & M. ROBERTSON (2019): Distributed acoustic sensing using dark fiber for near-surface characterization and broadband seismic event detection. – *Scientific Reports* **9**, 1, S. 1–14
- BAUER, K., NORDEN, B., IVANOVA, A., STILLER, M. & C. M. KRAWCZYK (2020): Wavelet transform-based seismic facies classification and modelling: Application to a geothermal target horizon in the NE German Basin. – *Geophysical Prospecting* **68**, S. 466–482, <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12853>
- BECKER, M. W., CIERVO, C., COLEMAN, T. & M. MONDANOS (2017): Fracture hydromechanical response measured by fiber optic distributed acoustic sensing at milliHertz frequencies. – *Geophysical Research Letters* **44**, S. 7295–7302; doi:10.1002/2017GL073931
- BLÖCHER, G., REINSCH, T., HENNINGES, J., MILSCH, H., REGENSPURG, S., KUMMEROW, J., FRANCKE, H., KRANZ, S., SAADAT, A., ZIMMERMANN, G. & E. HUENGES (2016): Hydraulic history and current state of the deep geothermal reservoir Groß Schönebeck. – *Geothermics* **63**, S. 27–43; doi:10.1016/j.geothermics.2015.07.008

- BÜCKER, C. & S. GROSSWIG (2017): Distributed temperature sensing in the oil and gas industry - insights and perspectives. - *Oil Gas European Magazine* **43**, 4, S. 209–221, doi: 10.19225/171207
- CARTLIDGE, E. (2021): DAS: A Seismic Shift in Sensing. – *Optics & Photonics News* **32**, S. 26–34; 1047-6938/21/06/26/8
- CURRENTI, G., JOUSSET, P., NAPOLI, R., KRAWCZYK, C. M. & M. WEBER (2021): On the comparison of strain measurements from fibre optics with a dense seismometer array at Etna volcano (Italy). – *Solid Earth* **12**, S. 993–1003, <https://doi.org/10.5194/se-12-993-2021>
- DALEY, T., FREIFELD, B., AJO-FRANKLIN, J., DOU, S., PEVZNER, R., SHULAKOVA, V., KASHIKAR, S., MILLER, D., GOETZ, J., HENNINGES, J. & S. LUETH (2013): Field testing of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) for subsurface seismic monitoring. – *The Leading Edge* **32**, S. 699–706, doi: 10.1190/tle32060699.1
- DEKORP-BASIN RESEARCH GROUP, 1999. The deep crustal structure of the Northeast German basin: New DEKORP-BASIN'96 deep-profiling results. – *Geology* **27**, S. 55–58.
- DOU, S., LINDSEY, N., WAGNER, A. M., DALEY, T. M., FREIFELD, B., ROBERTSON, M., PETERSON, J., ULRICH, C., MARTIN, E. R. & J.B. AJO-FRANKLIN (2017): Distributed acoustic sensing for seismic monitoring of the near surface: a traffic-noise interferometry. – *Scientific Reports* **7**, S. 11620, doi: 10.1038/s41598-017-11986-4
- EARLES, D. M., STOESZ, C. W., SURVEYOR, N., PEARCE, J. G. & H. A. DE JONGH (2011): Fiber Optic Strain Sensing at the Sand Face Enables Real-Time Flow Monitoring and Compaction Mitigation in Openhole Applications. – SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, USA.
- FREIFELD, B. M., FINSTERLE, S., ONSTOTT, T. C., TOOLE, P. & L. M. PRATT (2008): Ground surface temperature reconstructions: Using in situ estimates for thermal conductivity acquired with a fiber-optic distributed thermal perturbation sensor. – *Geophys. Res. Lett.* **35**, S. L14309, doi:10.1029/2008GL034762
- GEOPUR (2021): <https://www.gfz-potsdam.de/sektion/geophysikalische-abbildung-des-untergrunds/projekte/geopur-effiziente-erkundung-des-geothermischen-potenzials-in-urbanen-raeumen/>
- HARTOG, A. H., BELAL, M. & M. A. CLARE (2018): Advances in Distributed Fiber-Optic Sensing for Monitoring Marine Infrastructure, Measuring the Deep Ocean, and Quantifying the Risks Posed by Seafloor Hazards. – *Marine Technology Society Journal* **52**, S. 58–73
- HENNINGES, J., MARTUGANOVA, E., STILLER, M., NORDEN, B. & C. M. KRAWCZYK (2021): Wireline distributed acoustic sensing allows 4.2 km-deep vertical seismic profiling of the Rotliegend 150° C-geothermal reservoir in the North German Basin. – *Solid Earth* **12**, S. 521–537, <https://doi.org/10.5194/se-12-521-2021>
- HUSSELS, M. T., CHRUSCICKI, S., ARNDT, D., SCHEIDER, S., PRAGER, J., HOMANN, T. & A. HABIB (2019): Localization of Transient Events Threatening Pipeline Integrity by Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing. – *Sensors* **19**, S. 3322; doi:10.3390/s19153322
- JOUSSET, P., REINSCH, T., RYBERG, T., BLANCK, H., CLARKE, A., AGHAYEV, R., HERSIR, G. P., HENNINGES, J., WEBER, M. & C. M. KRAWCZYK (2018): Strain determination using fibre-optic cables allows identification of structural features. – *Nature Communications* **9**, S. 2509, doi:10.1038/s41467-018-04860-y
- JOUSSET, P., CURRENTI, G., TILMANN, F., ZUCCARRELO, L., CHALARI, A., REINSCH, T. & C. M. KRAWCZYK (2019): Towards seismic and volcanic hazard assessment with distributed acoustic sensing in fibre optic cables. – *Geophysical Research Abstracts* **21**, EGU 2019-17281
- JOUSSET, P., CURRENTI, G., SCHWARZ, B., CHALARI, A., TILMANN, F., REINSCH, T., ZUCCARELLO, L., PRIVITERA, E. & C. M. KRAWCZYK (2021): Fibre-optic Distributed Acoustic Sensing of volcanic events. – *Nature Communications*, **in Revision**
- KARRENBACH, M., KAHN, D., COLE, S., RIDGE, A., BOONE, K., RICH, J., SILVER, K. & D. LANGTON (2017): Hydraulic fracturing-induced strain and microseismic using in situ distributed fiber-optic sensing. – *Leading Edge* **36**, S. 837–844, <https://doi.org/10.1190/tle36100837.1>
- KINDLER, A. & S. GROSSWIG (2018): Distributed Strain Sensing in der Geotechnik. – *Bautechnik* **95**, S. 385–393
- KRAWCZYK, C. M., LÜTH, S., BIEDA, N. & C. WOLLIN (2021a): From DAS measurement to a seismic section: workflow example from a geothermal survey in Potsdam. – *Solid Earth* **eingereicht**
- KRAWCZYK, C. M., WOLLIN, C., LÜTH, S., LIPUS, M., CUNOW, C., SIEBERT, A., JOUSSET, P. & S. FUCHS (2021b): Urban DAS recording of a vibroseismic campaign with a 21 km-long dark fibre in Potsdam, Germany. – *Geophysical Research Abstracts* **21**, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-7868>
- KRAWCZYK, C. M., JOUSSET, P., CURRENTI, G., WEBER, M., NAPOLI, R., REINSCH, T., RICCOBENE, G., ZUCCARELLO, L., CHALARI, A. & A. CLARKE (2020): Monitoring volcanic and seismic activity with multiple fibre-optic Distributed Acoustic Sensing units at Etna volcano – EGU General

- Assembly, EGU2020-15252, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-15252>
- KRAWCZYK, C. M., JOUSSET, P. & T. REINSCH (2019): Fibre-Optic Strain Sensing: Game Changer for (Urban) Seismic Surveying? In: Proceedings EAGE. – 1st Conference on Geophysics for Infrastructure Planning Monitoring and BIM, S. 1–5, <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902547>
- KRAWCZYK, C. M., STILLER, M., BAUER, K., NORDEN, B., HENNINGES, J., IVANOVA, A. & E. HUENGES (2019): 3-D seismic exploration across the deep geothermal research platform Groß Schönebeck north of Berlin/Germany. – *Geothermal Energy* **7**, S. 1–18, <https://doi.org/10.1186/s40517-019-0131-x>
- LELLOUCH, A., LINDSEY, N. J., ELLSWORTH, W. L. & B. L. BIONDI (2020): Comparison between Distributed Acoustic Sensing and Geophones: Downhole Microseismic Monitoring of the FORGE Geothermal Experiment. – *Seismol. Res. Letters* **91**, S. 3256–3268, <https://doi.org/10.1785/0220200149>
- LIEHR, S., BORCHARDT, C. & S. MÜNZENBERGER (2020): LONG-DISTANCE FIBER OPTIC VIBRATION SENSING USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS AS REAL-TIME DENOISERS. – *Optics Express* **28**, S. 39311–39325, <https://doi.org/10.1364/OE.402789>
- LING, Z., FENG, W., XIANGCHUAN, W., YUN, P., ZHENQIN, S., JI, H. & Z. XUPING (2015): Distributed Strain and Vibration Sensing System Based on Phase-Sensitive OTDR. – *IEEE Photonics Technology Letters* **27**, S. 1884–1887
- LINDSEY, N. J., MARTIN, E. R., DREGER, D. S., FREIFELD, B., COLE, S., JAMES, S. R., BIONDI, B. L. & J. B. AJO-FRANKLIN (2017): Fiber-Optic Network Observations of Earthquake Wavefields. – *Geophysical Research Letters* **44**, S. 11792–11799, doi:10.1002/2017GL075722
- LIPUS, M. P., REINSCH, T., WEISENBERGER, T. T., KRAGSET, S., STEFANSSON, A. & S. BOGASON (2021a): Monitoring of a reverse cement job in a high-temperature geothermal environment. – *Geothermal Energy* **9**, S. 2195–9706, <https://doi.org/10.1186/s40517-021-00187-y>
- LIPUS, M. P., SCHÖLDERLE, F., REINSCH, T., WOLLIN, C., KRAWCZYK, C. M., PFRANG, D. & K. ZOSSEDER (2021b): Dynamic motion monitoring of a 3.6 km long steel rod in a borehole during cold-water injection with distributed fiber-optic sensing. – *Solid Earth Discuss.* preprint, <https://doi.org/10.5194/se-2021-63>
- MAHMOUD, S. S., VISAGATHILAGAR, Y. & J. KATSIFOLIS (2012): Real-time Distributed Fiber Optic Sensor for Security Systems: Performance, Event Classification and Nuisance Mitigation. – *Photonic Sensors* **2**, S. 225–236, doi:10.1007/s13320-012-0071-6
- MARRA, G., CLIVATI, C., LUCKETT, R., TAMPELLINI, A., KRONJÄGER, J., WRIGHT, L., MURA, A., LEVI, F., ROBINSON, S., XUEREBA, A., BAPTIE, B. & D. CALONICO (2018): Ultra-stable laser interferometry for earth-quake detection with terrestrial and submarine cables. – *Science*, <https://doi.org/10.1126/science.aat4458>
- MARTIN, E. R., HUOT, F., MA, Y., CIEPLICKI, R., COLE, S., KARRENBACH, M. & B. BIONDI (2018): A Seismic Shift in Scalable Acquisition Demands New Processing: Fiber-Optic Seismic Signal Retrieval in Urban Areas with Unsupervised Learning for Coherent Noise Removal. – *IEEE Signal Processing Magazine* **35**, S. 31–40
- MARTIN, E. R., CASTILLO, C. M., COLE, S., SAWASDEE, P. S., YUAN, S., CLAPP, R., KARRENBACH, M. & B. L. BIONDI (2017): Seismic Monitoring Leveraging Existing Telecom Infrastructure at the Stanford Distributed Acoustic Sensing Array: Active, Passive and Ambient Noise Analysis. – *The Leading Edge* **36**, 12, S. 1025–1031, doi:10.1190/tle36121025.1
- MARTUGANOVA, E., STILLER, M., BAUER, K., HENNINGES, J. & C. M. KRAWCZYK (2021): Cable reverberations during wireline distributed acoustic sensing measurements: their nature and methods for elimination. – *Geophysical Prospecting* **69**, 5, S. 1034–1054, <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2478.13090>
- MASOUDI, A. & T. P. NEWSON (2016): Contributed review: distributed optical fibre dynamic strain sensing. – *Rev. Sci. Instrum.* **87**, S. 011501, doi: 10.1063/1.4939482
- MATEEVA, A., LOPEZ, J., POTTERS, H., MESTAYER, J., COX, B., KIYASHCHENKO, D., WILLS, P., GRANDI, S., HORNMAN, K., KUVSHINOV, B., BERLANG, W., YANG, Z. & R. DETOMO (2014): Distributed acoustic sensing for reservoir monitoring with vertical seismic profiling. – *Geophysical Prospecting* **62**, S. 679–692, <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12116>
- MESTAYER, J., COX, B., WILLS, P., KIYASHCHENKO, D., LOPEZ, J., COSTELLO, M., BOURNE, S., UGUETO, G., LUPTON, R., SOLANO, G., HILL, D. & A. LEWIS (2011): Field trials of distributed acoustic sensing for geophysical monitoring. – *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, S. 4253–4257
- MILLER, D., PARKER, T., KASHIKAR, S., TODOROV, M. & T. BOSTICK (2012): Vertical seismic profiling using a fibre-optic cable as a distributed acoustic sensor. – *Conference Proceedings 74th EAGE Conference*, Y004
- MICHLMAYR, G., CHALARI, A., CLARKE, A. & D. OR (2016): Fiber-optic high-resolution acoustic emission (AE) monitoring of slope failure. – *Landslides*, <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0776-5>

- MOLTENI, D., WILLIAMS, M.J. & C. WILSON (2017): Detecting microseismicity using distributed vibration. – *First Break* **35**, S. 51–55
- NÖTHER, N., WOSNIOK, A., KREBBER, K. & E. THIELE (2008): A distributed fiber optic sensor system for dike monitoring using Brillouin optical frequency domain analysis. – *Proc. SPIE* 6933, doi:10.1117/12.775133
- PARKER, T., SHATALIN, S. & M. FARHADIROUSHAN (2014): Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications. – *First Break* **32**, 2, S. 61–69, <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013034>
- PEARCE J.G., RAMBOW, F. H. K., SHROYER, W., HUCKABEE, P., DE JONGH, H., DRIA, D. E., CHILDERS, B. A., HALL, T. & T. DOMINIQUE (2009): High Resolution, Real-Time Casing Strain Imaging for Reservoir and Well Integrity Monitoring: Demonstration of Monitoring Capability in a Field Installation. – *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.2118/124932-MS>
- PENG, F., DUAN, N., RAO, Y.J. & J. LI (2014): Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR. – *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26**, S. 2055–2057
- REINSCH, T., JOUSSET, P. & C. M. KRAWCZYK (2021): Fiber Optic Distributed Strain Sensing for Seismic Applications. In H. K. Gupta (Ed.). – *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series 2nd Ed.* Springer Nature Switzerland. S. 379–383, https://doi.org/10.1007/978-3-030-58631-7_284
- REINSCH, T., THURLEY, T. & P. JOUSSET (2017): On the mechanical coupling of a fiber optic cable used for distributed acoustic/vibration sensing applications - a theoretical consideration. – *Measurement Science and Technology* **28**, S. 127003; doi:10.1088/1361-6501/aa8ba4
- REINSCH, T.; BLÖCHER, G.; MILSCH, H.; BREMER, K.; LEWIS, E.; LEEN, G. & S. LOCHMANN (2012): A fibre optic sensor for the in-situ determination of rock physical properties. – *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **55**, S. 55–62
- RISSDOM (2021): <https://www.gfz-potsdam.de/sektion/geoenergie/infrastruktur/geothermie-forschungsplattform-gross-schoenebeck/>
- SAEMUNDSSON, K. (1979): Outline of the geology of Iceland. – *Jokull* **29**, S. 7–28
- SCHENATO, L., PALMIERI, L., CAMPORESE, M., BERSAN, S., COLA, S., PASUTO, A., GALTAROSSA, A., SALANDIN, P. & P. SIMONINI (2017): Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering. – *Scientific Reports* **7**, S. 14686; <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12610-1>
- SIGMUNDSSON, F., EINARSSON, P., HJARTARDÓTTIR, A. R., DROUIN, V., JÓNSDÓTTIR, K., ÁRNADÓTTIR, T., GEIRSSON, H., HREINSDÓTTIR, S., LI, S. & B. ÓFEIGSSON (2020): Geodynamics of Iceland and the signatures of plate spreading. – *J. Volcanol. Geoth. Res.* **391**, S. 106436; doi:10.1016/j.jvolgeores.2018.08.014
- STACKEBRANDT, W. & D. FRANKE (2015): *Die Geologie von Brandenburg*. – 805 S., Stuttgart (Schweizerbart)
- SWP (2021): <https://www.swp-potsdam.de/tiefengeothermie/>
- WANG, H. F., ZENG, X., MILLER, D. E., FRATTA, D., FEIGL, K. L., THURBER, C. H. & R. J. MELLORS (2018): Ground motion response to an ML 4.3 earthquake using co-located distributed acoustic sensing and seismometer arrays. – *Geophysical Journal International* **213**, S. 2020–2036
- WOLLIN, C., LÜTH, S., LIPUS, M., CUNOW, C., SIEBERT, A., JOUSSET, P., FUCHS, S. & C. M. KRAWCZYK (2021): Vibrator-source exploration seismics in urban environments using DAS, a feasibility study in Potsdam, Germany. – *General Assembly Seismol. Soc. America*, April 2021, virtual
- WU, H., XIAO, S., LI, X., WANG, Z., XU, J. & Y. RAO (2015): Separation and Determination of the Disturbing Signals in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ -OTDR). – *Journal of Lightwave Technology* **33**, S. 3156–3162
- YU, G., CAI, Z., CHEN, Y., WANG, X., ZHANG, Q. & Y. LI (2016): Walkaway VSP using multimode optical fibers in a hybrid wireline. – *The Leading Edge* **35**, S. 615–619; <http://doi.org/10.1190/tle35070615.1>

Anschrift der Autorin

Prof. Dr. Charlotte Krawczyk

Helmholtzzentrum Potsdam
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ
Telegrafenberg
D-14473 Potsdam

und

Technische Universität Berlin
Fachgebiet Angewandte Geophysik
Ernst-Reuter-Platz 1
D-10587 Berlin

E-Mail: lotte@gfz-potsdam.de